

# 基于应变的多模光纤可调谐光纤滤波器设计

彭石军 刘亚南 薛金来 张安娜 张建中

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 可调谐光纤滤波器技术是波分复用系统的关键技术之一,对于发展全光通信网络和光纤传感具有极其重要的意义。提出了一种基于大芯径的多模光纤可调谐带阻滤波器,其制作方法是包层/纤芯直径为 125/105  $\mu\text{m}$  的特种多模光纤通过单模光纤接入光纤系统,实现单模-多模-单模(SMS)光纤结构,并使一端单模光纤与多模光纤熔接,另一端只是共轴对接而不焊接。在多模干涉原理的基础上,利用该结构对应变的敏感性实现可调谐光滤波。该可调谐滤波器的调制和解调借助于放大自发辐射(ASE)宽谱光源和光谱分析仪(OSA)实现。详细给出了该滤波器的理论仿真分析,并实验证实了该方案的有效性。

**关键词** 光纤光学;波分复用;大芯径多模光纤;可调谐光纤滤波器

中图分类号 O436;TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0505004

## Design of Multi-Mode Fiber Tunable Optical Filter Based on Strain

Peng Shijun Liu Ya'nan Xue Jinlai Zhang Anna Zhang Jianzhong

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** It has been known that tunable optical filter technology is one of the most critical techniques for wavelength-division multiplex (WDM), and the tunable optical fiber filter technique is extremely important for the development of all-optical networks and fiber-optic sensors. A new tunable band-rejection optical filter based on large core-diameter multimode optical fiber is projected. The filter is realized by a single-multi-single (SMS) mode fiber optical structure, which is composed of a multimode fiber with the cladding/core diameter of 125/105  $\mu\text{m}$  and standard single mode fiber, with the end interface not welding together. Based on the multimode interference principle, the structure implements the filtering by use of the structure sensitive to the stress. A broadband source which is amplified spontaneous emission (ASE) and an optical spectrum analyzer are used to monitor the transmission spectrum. Experimental and simulation results are given to prove the feasibility of the improved SMS structure.

**Key words** fiber optics; wavelength division multiplex; large core-diameter multimode fiber; tunable optical fiber filter

**OCIS codes** 060.2430; 060.2280; 060.4510; 350.2460

## 1 引 言

随着光纤通信技术和光纤传感技术的快速发展,波分复用(WDM)技术被更广泛地使用,而光纤滤波器是波分复用器的关键器件之一,因此可调谐光滤波技术也成为 WDM 的一项关键技术。在光通信中,可调谐光滤波器作为动态和可重构的 WDM 系统交换元件,被广泛用作光的上下路复用

器。在光纤传感网络中,可调谐滤波器可用作 WDM 的解复用、信号解调等,发挥着极其重要的作用。另外,可调谐光滤波器还在光纤放大器中的信号滤波器、光纤激光器及频谱分析仪中有重要应用。实现光纤滤波的方法有很多,目前已经设计出了多种光纤滤波器结构,根据实现滤波的原理可将其分为以下几类:1)基于耦合器结构原理的光纤滤波器,

收稿日期: 2011-02-07; 收到修改稿日期: 2011-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(60907034,61077063)、黑龙江省自然科学基金(LC08C02)、哈尔滨工程大学高校基础科研基金(20101104,L20101102)、2011~2013 哈尔滨市留学回国基金(2011RFLXG004)和哈尔滨工程大学高层次创新人才国际交流项目资助课题。

作者简介: 彭石军(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: pengshijun2010@yahoo.com.cn

导师简介: 张建中(1978—),男,博士,副教授,主要从事光纤智能结构方面的研究。

E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

如抛光非平衡光纤耦合器、级联熔锥光纤耦合器、非对称双芯光纤耦合器<sup>[1]</sup>等;2)基于光栅原理的光纤滤波器,如光纤布拉格光栅(FBG)滤波器<sup>[2]</sup>和长周期光栅(LPG)滤波器<sup>[3]</sup>,另外还有基于啁啾相移光纤光栅滤波器<sup>[4,5]</sup>、倾斜莫尔布拉格光纤光栅滤波器<sup>[6]</sup>等;3)基于光纤干涉仪的光纤滤波器,如基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪、非平衡马赫-曾德尔干涉仪<sup>[7]</sup>和迈克耳孙干涉仪等光纤滤波器;4)基于声光调制机制的声光滤波器<sup>[8]</sup>等。

虽然现有的光纤滤波器种类繁多,但是很多滤波器加工工艺难度大、结构复杂,导致滤波器的制作成本较高。如FBG滤波器有40 nm宽的可调谐滤波范围,但是依赖于拉伸或压缩,这样又不能使其长期处于拉伸或压缩状态;LPG滤波器也有较宽可调谐滤波范围,但是需要在光纤上写光栅,提高了成本;在线F-P滤波器已经商业化,也有很好的调谐范围,但是价格昂贵。2006年,W. S. Mohammed等<sup>[9]</sup>提出了一种基于单模-多模-单模(SMS)光纤结构的新型全光纤带通滤波器。这种全光纤的带通滤波器因结构简单,制作方便,成本低廉,吸引了同行

的注意。然而这种SMS光纤结构的带通滤波器可调谐滤波动态范围小,通过应变的调节,只能实现2 nm以内的可调谐滤波。因此,本文提出了一种新颖的、可调谐范围大的、基于应变的多模光纤(MMF)带阻滤波器。

## 2 多模光纤带阻滤波器实施方案与原理

早在2004年,W. S. Mohammed等<sup>[10]</sup>就报道了基于多模干涉效应的波长可调谐光纤镜的研究工作,尤其是对SMS光纤结构的模式传输和多模干涉原理进行了较详细的叙述。研究者将普通单模光纤(SMF)与多模光纤对接在一起,通过改变入射波长使轴向聚焦位置发生变化,发现入射波长和聚焦点位置呈线性关系,并通过实验验证了这一线性关系。随后,不少研究人员利用自成像效应和多模干涉效应,对这种SMS光纤结构进行了更进一步的研究。

2006年,W. S. Mohammed等<sup>[9]</sup>在前人的基础上,将SMS光纤依次熔接,研制出了全光纤带通滤波器,该滤波器结构如图1所示。

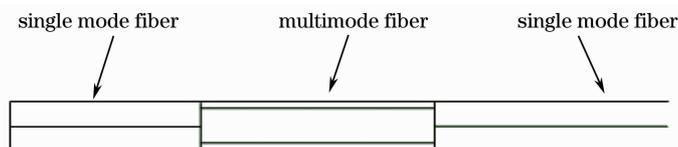


图1 全光纤多模干涉带通滤波器结构

Fig. 1 Structure of all-fiber multimode interference band-pass filter

这种滤波器13 dB对应的带宽约50 nm,而插入损耗只有0.4 dB;多模光纤长仅6 cm,便于封装,其中心波长位于1550 nm附近,正好是在通信窗口,这使其在通信领域有很好的应用前景。此后,Q. Wang等<sup>[11]</sup>又对这种结构做了更细致、更精确的研究,并提出了一种简单的光谱响应分析方法,根据文献<sup>[9]</sup>中的方法分析可知,对两根相同的单模光纤而言,总耦合效率定义为

$$\eta = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{M-1} \bar{a}_j^2 \bar{a}_k^{*2} \exp[i(\beta_j - \beta_k)z], \quad (1)$$

式中 $a_j, a_k$ 分别表示第 $j$ 阶模式和第 $k$ 阶模式的激励系数, $\beta_j, \beta_k$ 分别表示第 $j$ 阶模式和第 $k$ 阶模式的传输常数, $M$ 为总的模式数。由(1)式可知,改变多模光纤的长度,耦合效率也随之改变。因此,优化多模光纤长度,可以使耦合效率最大,此时在多模光纤的端面上的场分布恰好是入射场的像。同时要求幅角 $\theta$ 必须是 $2\pi$ 的整数倍,而幅角条件依赖于入射光波长。当不满足此条件时,有效耦合效率将会下降,

从而实现了光滤波功能。

W. S. Mohammed等<sup>[9,10]</sup>从理论和实验两方面研究了多模光纤的长度、单模和多模光纤的几何尺寸等因素对滤波器的中心波长、带宽等的影响,其理论分析与实验结果相符合。从他们的研究成果可知,滤波器的带宽由多模光纤纤芯尺寸决定,半径越小,带宽越宽;可以通过控制多模光纤的长度控制滤波器中心波长的位置。

尽管这种滤波器带宽和中心波长可以通过调整多模光纤的参数来控制,但是调节的范围有限而且很不方便,因此本文提出了一种基于应变效应的多模光纤可调谐滤波器,结构如图2所示。

该可调谐多模光纤滤波器基本结构还是由SMS光纤组成,滤波原理也是基于多模干涉和自成像效应。不同的是将第一根单模与多模光纤熔接上,而第二根单模光纤只跟多模光纤对接而不焊接,结构外部套上毛细管,并在内部填充匹配液。这样当第二根单模光纤受到一定的应力时,多模光纤和

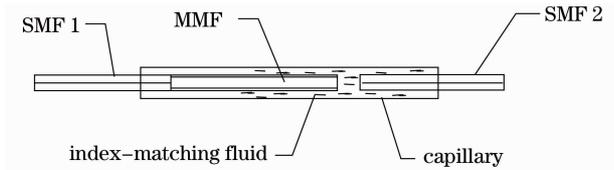


图 2 基于应变的可调谐多模光纤滤波器

Fig. 2 Strain based tunable multimode fiber filter

单模光纤两端面之间的距离就会改变,使滤波器中心波长的位置发生变化,从而实现光滤波的功能。

### 3 多模光纤带阻滤波器仿真与实验

首先利用 Beamprop 软件的光束传播法对这种新型的光纤滤波结构进行了仿真。仿真时以  $1.55 \mu\text{m}$  波长的入射光入射,多模光纤的长度取  $4.8 \text{ cm}$ ,单模-多模光纤的空隙中填充匹配液,折射率为  $1.442$ ,仿真结果如图 3 所示。从图 3 可知,多模干涉不仅仅在多模光纤内发生,而且在多模光纤和单模光纤端面之间的空隙处发生,出现明暗相间的点,即多模干涉的加强或减弱点。这些干涉加强或减弱的点直接关系到出射光的强弱,如果干涉加强的点刚好被出射单模光纤接收,则出射光较强;反之,则出射光较弱。因此,只要改变多模光纤和单模光纤之间的距离,多模干涉的位置就会随之改变,并使输出光的强度也随之变化,从而实现滤波。以不同的波长入射,就可以得到该滤波器的透射谱,干涉光强极弱处对应的波长为中心波长;再改变单模-多模光纤两端面之间的距离,就可以仿真得到一系列的透射谱,仿真结果如图 4 所示,在该仿真中多模光纤长度为  $5.2 \text{ cm}$ 。从图 4 可以看出,随着单模-多模光纤两端面之间距离的增大,透射谱向短波长方向漂移。图 5 更清晰地反映了该滤波器中心波长同单模-多模光纤端面距离之间的线性关系,并得到了

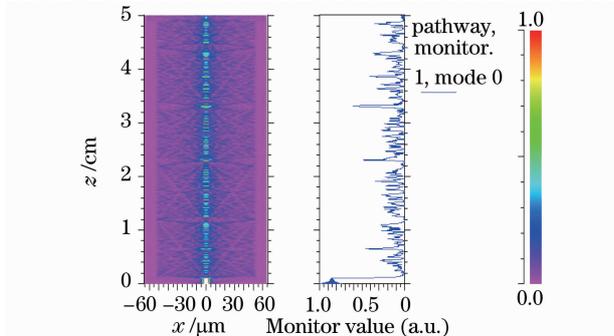


图 3 单模-多模光纤端面间距  $100 \mu\text{m}$  时的传输场分布

Fig. 3 Transmitted optical field distribution when the the distance between single mode and multimode fiber is  $100 \mu\text{m}$

$8.5 \text{ nm}$  的可调谐滤波范围和  $-0.0388 \text{ nm}/\mu\text{m}$  的中心波长随距离变化的响应度。为了得到最大的可调谐滤波范围,仿真了采用不同长度的多模光纤时可调谐滤波的情况,仿真结果如图 6 所示。从图 6 可知,在多模光纤长  $4.2 \text{ cm}$  左右可以得到最大的可调谐滤波范围。因此,可以预期,选取长度合适的多模光纤以及合适的匹配液,这种滤波器是可行的。

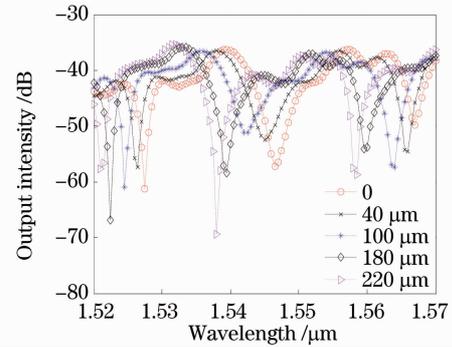


图 4 单模-多模光纤端面间不同间距下滤波器的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra when the distance between

SMF and MMF is different

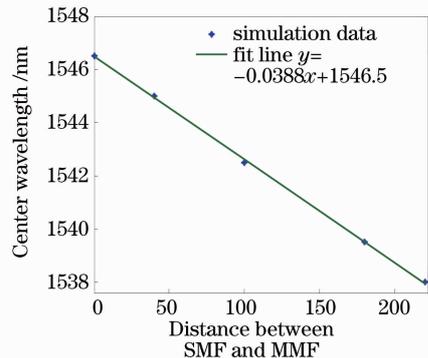


图 5 中心波长同单模-多模光纤之间距离的关系

Fig. 5 Linear relationship of center wavelength and the distance between SMF and MMF

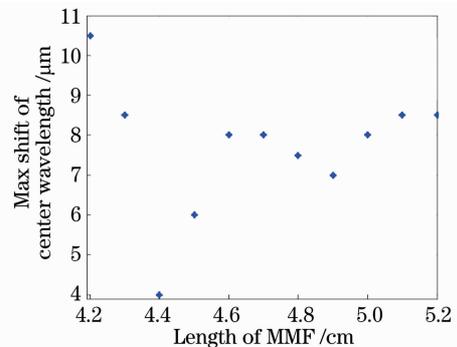


图 6 多模光纤长度不同时中心波长的最大漂移

Fig. 6 Max shift of the center wavelength when the length of MMF is different

为了更进一步说明该滤波器的可行性,通过实验对这种滤波器进行了测试。实验时调制和解调设备选用的是放大自发辐射(ASE)宽谱光源和光谱分析仪(OSA),将滤波器的输入端与 ASE 相连,输出端与 OSA 相连接。将图 2 所示的滤波器架在微位移调整架上,多模光纤的长度为 4.7 cm,旋转螺旋测微仪,改变多模光纤和单模光纤端面之间的距离,观察透射谱的变化情况,实验结果如图 7,8 所示。

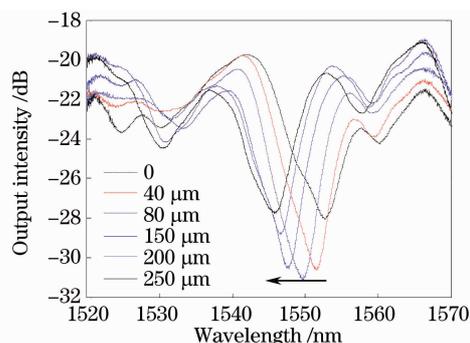


图 7 透射谱随单模光纤和多模光纤两端面之间距离的改变而发生的变化

Fig. 7 Transmission spectra of the filter when the distance between SMF and MMF is different

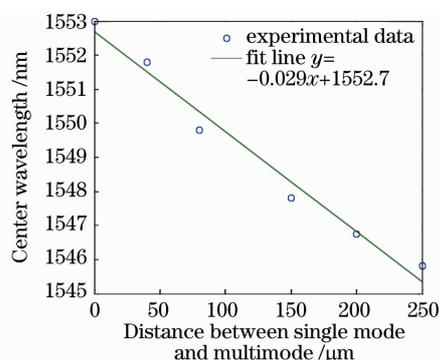


图 8 中心波长随单模光纤和多模光纤两端面之间距离变化的线性关系

Fig. 8 Linear relationship of center wavelength and the distance between SMF and MMF

从图 7 可以看出,SMS 结构的透射谱随多模光纤和单模光纤端面之间的距离改变而发生漂移,而且随着间距的增大,透射谱向短波长方向漂移,实验结果同仿真结果完全一致,而且 3 dB 对应的带阻滤波带宽约 4.3 nm。图 8 更清楚地反映出滤波器的中心波长同两光纤端面之间距离的线性关系,根据图 8 中的拟合曲线,可知该滤波器的可调谐范围约为 5 nm,随单模光纤和多模光纤之间距离变化的调谐率约为  $-0.029 \text{ nm}/\mu\text{m}$ ,同仿真分析的结果比较接近。而且滤波器的可调谐范围可以通过优化多模光纤的长度得以改善,由仿真分析结果知最大可调

谐范围可达 10.5 nm。由于该滤波器一端的单模光纤跟多模光纤是对接而不是熔融焊接在一起,而且两者之间填充了匹配液,从而导致该带阻滤波器的插入损耗比较大,实验测得的损耗达 10 dB 以上。但是可以通过优化多模光纤长度和芯径等参数以降低插入损耗。

需要指出的是,基于 SMS 光纤结构的透射谱还会随着环境温度升高而向长波长方向漂移。对该结构的温度响应进行了测试,实验结果为  $-44.8 \text{ pm}/\text{C}$ 。另外,这种滤波器在应用时需避免产生弯曲,因为弯曲将使滤波结果产生较强烈的变化。

## 4 结 论

开展了基于应变效应的多模光纤可调谐滤波器的研究,提出了一种动态范围大、精度高的光纤滤波方案。实验得到了 3 dB 带宽约 4.3 nm,可调谐滤波范围达 5 nm 的多模光纤滤波器,理论分析和实验结果都证明了该方案的有效性和可行性。目前的结果只是阶段性成果,而且都是在实验室环境下完成的,有些地方还有待改进,譬如封装的问题还有待进行更进一步的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Xiwen Sun. Wavelength selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2484~2486
- 2 J. Mora, M. V. Andrés, J. L. Cruz *et al.*. Tunable all-optical negative multitap microwave filters based on uniform fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 1308~1310
- 3 Fang Hong, Qin Xi, Pei Li *et al.*. Designing of tunable optical filter based on long-period fiber grating[J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2005, **16**(1): 6~9  
方宏,秦曦,裴丽等.基于长周期光纤光栅的可调谐光滤波器设计[J]. *光子·激光*, 2005, **16**(1): 6~9
- 4 Lu Shaohua, Xu Qu, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical fibers based on chirped phase-shifted fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1675~1680  
鲁韶华,许欧,冯素春等.基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1675~1680
- 5 Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Wavelength tunable band-pass filter based on chirped fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 873~878  
姜萌,张伟刚,金龙等.基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 873~878
- 6 Allan C. L. Wong, Marco Giovinazzo, Hwa-Yaw Tam *et al.*. Tilted Moiré fiber Bragg grating optical filters with controllable passband and stopband[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(6): 898~904
- 7 Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characterizes of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1191~1194  
李卫斌,孙俊强.一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分

- 析[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1191~1194
- 8 Y. Jung, S. Choi, Y. S. Jeong *et al.*. Hollow optical fiber core mode blocker for acousto-optic tunable band-pass filter [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2004, CThMM6
- 9 W. S. Mohammed, P. W. E. Smith. All-fiber multimode interference band-pass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2547~2549
- 10 W. S. Mohammed, Alok Mehta Eric G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477
- 11 Qian Wang, Gerald Farrell, Wei Yan. Investigation on single-mode-multimode-single mode structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(5): 512~519